

定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究

董荣万 朱兴平 何增化 万廷朝 王小平

(甘肃省定西地区水土保持科学研究所·定西县·743000)

摘要 通过在高泉沟小流域建立的水土流失监测网络,系统研究了小流域自然因素和人为因素与土壤侵蚀的关系,小流域水土流失时空变化规律及小流域水流泥沙概念性耦合模型,揭示了定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律,并建立了坡面土壤侵蚀数学模型。人为因素减水减沙的贡献率分别为 79.11%和 85.69%,由降雨减少引起的减水减沙的贡献率分别为 20.89%和 14.3%;并应用水流泥沙概念性耦合模型,对“两期”治理效果进行了分析评价,探索了模型法评估水土保持减水减沙总效果的途径。

中图分类号: S157.1

关键词: 土壤侵蚀 降雨侵蚀力 植被度 减水减沙 概念性 耦合模型

Laws of Soil Erosion in Loess Hilly and Gully Region of Dingxi Prefecture

Dong Rongwan Zhu Xingping He Zenghua Wan Tingchao Wang Xiaoping

(Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi Prefecture, Gansu Province, 743000, PRC)

Abstract Based on the monitoring net of soil and water conservation at Gaoquan gully small watershed, the relation between natural factors and man-made factor, the laws of time and spacial variation, the generalized coupling model of sediment at small watersheds were studied systematically, and the mathematic model was established. The results show that the contributing ratio of man-made factor to runoff and sediment reduction was 79.11%, and that of natural factors was 85.69%. The laws of time and spacial variation of loess anti-erodibility and erodibility, and the effects of different indexes on runoff and sediment yield were analysed, the mathematic model on relation between vegetation and soil erosion was also established. According to the generalized coupling model, the effect of “two periods” harness was analysed and evaluated.

Keywords: soil erosion; erodibility of rainfall; vegetation ratio; runoff and sediment reduction; generality; coupling model

以小流域为单元开展综合治理和生态环境建设,必须将有效地控制水土流失作为前提,其最终目的是实现全流域生态经济系统良性循环和持续发展。因此,围绕防止水土流失,进行土壤侵蚀规律研究十分必要。

目前,国内学者在土壤侵蚀方面较多地注意了对单因素的研究,而对多因素综合影响下的侵蚀规律研究较少。据此,我们根据甘肃省农科院主持的国家“八·五”攻关专题《定西黄土丘陵沟壑区高效农业生态区建设与发展研究》的要求,在具有同类型区代表性的高泉沟流域开展

定位研究。鉴于黄土高原的小流域既是一个完整的侵蚀产沙和输沙系统, 又是流域综合治理的基本单元, 所以, 将土壤侵蚀研究置于一个流域系统之中, 系统地研究小流域在各种自然因素和人为因素影响下的土壤侵蚀发生发展规律。只有掌握土壤侵蚀的基本规律, 才能把水土保持综合治理和生态环境建设置于科学的基础上, 使之逐步走向科学化、系统化、规范化。

1 流域土壤侵蚀的自然基础

高泉沟流域是黄河流域祖厉河水系关川河支流的小支沟, 位于东经 $104^{\circ}31'52'' \sim 104^{\circ}34'$, 北纬 $35^{\circ}22' \sim 35^{\circ}25'$, 海拔 2 056 ~ 2 447 m, 流域面积 9. 168 km² 属定西县团结乡管辖。水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第 V 副区。

气候: 属中温带半干旱气候, 年均气温 6.2 °C, 年均 ≥ 0 °C 活动积温 2 789.7 °C, 年均 ≥ 10 °C 活动积温 2 071.1 °C, 极端最高、最低气温为 34.3 °C 和 -27.1 °C。年均降水量 415.2 mm, 7 ~ 9 月降水占全年总降水量的 56%, 最高年降水量 721.8 mm (1967 年), 最低年降水量 245.7 mm (1982 年)。太阳辐射量 5.558×10^9 J/m², 生育期辐射量 3.832×10^9 J/m²。年日照时数 2 500 h, 无霜期 140 d。蒸发量 1 318 mm。

地形地貌: 属黄土覆盖的梁状缓坡丘陵沟壑地形, 南高北低, 相对高差 391 m, 其制高点为黄河水系祖厉河流域与渭河流域的分水岭。流域被两条一级主沟道切割, 形成“两沟一梁四面坡”的地貌特征。其中 I 号沟长 6.825 km, 流向自南向北; II 号沟长 3.40 km, 流向自西南向北。两沟交汇于流域出口卡口径流观测站。主沟横剖面一般呈矩形宽浅槽式, 为“U”型谷。

流域内梁峁顶、梁峁坡、阶坪川台和沟谷分别占流域总面积的 6.9%, 52.4%, 13.8% 和 26.9%。流域内 $< 5^{\circ}$ 的土地占总面积 32.3%, $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的占 38.8%, $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的占 17.3%, $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的占 6.1%, $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的占 5.5%。流域总分歧比 5.81, 沟壑密度 2.38 km/km² 延长系数 0.5, 平均宽 1.343 km, 长宽比 5:1。

土壤: 流域内有山地灰褐土、坡地黑麻土、坡地黄麻土、坡地白麻土、坡地麻土、谷地麻土、川地麻土、川地黄麻土、川地黄绵土 9 个土壤类型。其中黄麻土类占 75%, 黄绵土类占 10%。主体土类有机质含量在 10 g/kg 以下, 速效磷 (指 P₂O₅) 含量 1.3 ~ 2.9 mg/kg, 属极缺, 速效氮含量 30 ~ 60 mg/kg, 主体土类属国际 4 级以下贫瘠土壤。流域治理前土壤侵蚀模数 6 120 t/(km²·a)。农耕地土层厚度 2 ~ 10 m, 据农田 20 cm 剖面土层测定, 密度 2.64 ~ 2.69 g/cm³, 容重 1.12 ~ 1.39 g/cm³, 孔隙度 48.5% ~ 57.3%, pH 值为 7.5 ~ 8.6。

植被: 属于干草原植被类型, 全流域蕨类植物、裸子植物及被子植物共 54 科 187 属 290 种 (包括野生和栽培两方面), 其中天然植被以禾本科和菊科为主, 常形成针茅、百里香、蒿类等植物群落, 有零星沙棘、猫儿刺灌丛分布。流域内无天然乔木林分布。人工植被有以杨树为主的人工林和以紫花苜蓿为主的人工草, 其覆盖度为 39.41%, 另外还有以春小麦、洋芋等为主的季节性农业植被。

2 研究内容与方法

2.1 自然因素与土壤侵蚀关系研究

从 1988 年至 1994 年, 在高泉沟 36 个径流小区内进行, 主要研究降雨和地形 2 个基本因素与土壤侵蚀关系。分不同坡度、不同坡长和不同坡形 3 组试验进行观测, 观测项目有: 径流量、侵蚀量和土壤水分等, 同时利用虹吸式自计雨量计观测各次降雨总量及雨强变化过程。观

测时间每年5~9月。全部数据在微机上回归分析。

土壤抗剪力试验: 从1992年8月至1993年7月, 在梁峁顶、梁峁坡和沟谷3个地貌类型区设5个样本区, 用ZJ-2型等变直剪仪, 野外测定0~15 cm, 15~30 cm土层的抗剪力, 同时进行土壤含水率及湿容重测定。

2.2 人为因素与土壤侵蚀关系研究

自1991年至1994年, 对全流域的水保拦蓄工程选取44个定位观测点, 其中, 水平沟、鱼鳞坑、护沟埂、土堰、土谷坊、柳谷坊各布设测点6个, 水窖测点5个, 涝池测点3个。各测点均设1.0 m或1.5 m监测桩, 每年5~9月, 每次降雨后观测水位、泥位, 查面积推算拦水量、拦泥量。结合调查拦蓄资料, 分析研究小流域人为因素减水减沙的作用效果, 并进行评价。

另外, 进行人工草地不同植被度对产流产沙影响研究, 按5%, 20%, 40%, 60%, 80% 5种植被度布设试验小区, 小区种植紫花苜蓿。观测项目: 径流深、侵蚀量和植被度等, 植被度用方格法测定。观测时间每年5~9月。

2.3 小流域水土流失时空分布规律研究

自1991年至1994年, 通过已建立的雨量网点、径流小区和卡口站的系统观测, 结合全流域水保拦蓄工程定位观测资料, 在研究流域土壤侵蚀类型及侵蚀方式时空分布的同时, 着重研究不同地貌形态土壤侵蚀区和不同土地利用措施下的水土流失时空分布规律。观测时间: 卡口站是每年3~9月, 观测项目: 水位、流量、径流总量、泥沙总量等。其它观测项目观测时间为每年5~9月。

2.4 小流域水流泥沙概念性耦合模型研究

采用分解研究的思想, 把全流域水流泥沙分为产流、汇流、产沙、汇沙4部分7个阶段来研究。以理论研究为指导, 计算机模拟技术为工具, 实际流域为检验依据, 实行实验和观测, 理论研究与计算机模拟技术相结合的综合研究方法。

3 研究结果

3.1 自然因素与土壤侵蚀关系研究

3.1.1 降雨和地形因素与坡面水土流失关系研究 通过对降雨量 P , 平均雨强 I , 最大30 min雨强 I_{30} , 最大10 min雨强 I_{10} , 降雨历时 T 及复合因子 PI , PI_{30} , PI_{10} 8个表示降雨特征的指标分别与坡面径流量、土壤侵蚀量的曲线回归分析, 结果表明: PI_{30} 可以作为该区表示降雨侵蚀力的指标, 降雨量 P 可以作为反映坡面产流的主要参数。其关系式依次为:

$$M = 10.4372 + 1.0354PI_{30} \quad (1)$$

$$Q = -0.5458 + 0.0436P \quad (2)$$

式中: M ——坡面土壤侵蚀量 ($\text{kg}/50\text{m}^2$); P ——次降雨总量 (mm); I_{30} ——次降雨过程中最大30 min雨强 (mm/min); Q ——次降雨产生的坡面径流量 ($\text{m}^3/50\text{m}^2$)。

坡度与坡面水土流失的关系: 对不同坡度小区42场次降雨实测资料进行分析, 结果如下:

在不同 PI_{30} 情况下, 坡度与土壤侵蚀量的关系为:

$$\text{当 } PI_{30} \leq 5 \text{ 时 } M = 3.2055 + 0.0685S \quad (3)$$

$$\text{当 } PI_{30} > 5 \text{ 时 } M = 7.0105 \times S^{0.3073} \quad (4)$$

$$\text{当 } PI_{30} \geq 10 \text{ 时 } M = 51.517 \times 0.9865^S \quad (5)$$

在不同 P 情况下, 坡度与坡面径流量的关系为:

$$\text{当 } P \leq 20 \text{ 时} \quad Q = 0.125 2 \times 1.029 6^S \quad (6)$$

$$\text{当 } 20 < P < 30 \text{ 时} \quad Q = 0.535 4 - 1.465 / S \quad (7)$$

$$\text{当 } P \geq 30 \text{ 时} \quad Q = 1 / (0.9131 + 26.922e^{-S}) \quad (8)$$

式中: M ——坡面土壤侵蚀量($\text{kg}/50 \text{ m}^2$); Q ——坡面径流量($\text{m}^3/50 \text{ m}^2$); S ——坡度($^\circ$)。

认为,在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的坡度范围内,坡度与坡面土壤侵蚀量之间关系密切,在不同 PI_{30} 条件下,其密切程度具有一定差异,其关系有直线、幂曲线和指数曲线 3 种;在不同雨量条件下,坡度对坡面径流量的影响各异,在 $P < 30$ 时,达显著和极显著水平,其关系呈指数曲线和双曲线 2 种,但在 $P \geq 30$ 时,坡度对坡面径流量的影响不显著。

坡长与坡面水土流失的关系:通过对 10 m, 15 m, 20 m, 和 25 m 4 种坡长小区 42 场次降雨径流侵蚀实测资料进行分析,结果如下:

在 $5 < PI_{30} < 10$ 和 $PI_{30} \geq 10$ 时,坡长对坡面土壤侵蚀量均有较大影响,分别达到显著和极显著水平,其关系式如下:

$$\text{当 } 5 < PI_{30} < 10 \text{ 时} \quad M = 0.601 - 4.663 1 / L \quad (9)$$

$$\text{当 } PI_{30} \geq 10 \text{ 时} \quad M = 1.354 2 - 0.042 2L \quad (10)$$

式中: M ——单位面积上的坡面土壤侵蚀量(kg/m^2); L ——坡长(m)。

$PI_{30} \leq 5$ 时,坡长对坡面土壤侵蚀量的影响不显著。在不同雨量 P 条件下,坡长对坡面径流量的影响不显著。

坡形与坡面水土流失的关系:通过对 1992 ~ 1994 年 3 a 间 9 场次降雨径流侵蚀实测资料进行分析,结果如下:

(1) 不同坡形小区 PI_{30} 与坡面土壤侵蚀量的关系式:

$$\text{凹形} \quad M = 1 / (7.477 1 + 300.855 2e^{-PI_{30}}) \quad (11)$$

$$\text{台阶形} \quad M = 1 / (-9.454 9 + 896.176 4e^{-PI_{30}}) \quad (12)$$

$$\text{凸形} \quad M = 1 / (8.757 5 + 212.875 7e^{-PI_{30}}) \quad (13)$$

$$\text{直线形} \quad M = 1 / (9.03 + 300.306 9e^{-PI_{30}}) \quad (14)$$

(2) 不同坡形降雨量 P 与坡面径流量的关系式:

$$\text{凹形} \quad Q = -0.067 7 + 0.009 1P \quad (15)$$

$$\text{台阶形} \quad Q = -0.098 3 + 0.008 6P \quad (16)$$

$$\text{凸形} \quad Q = -0.054 4 + 0.008 1P \quad (17)$$

$$\text{直线形} \quad Q = -0.055 2 + 0.007 8P \quad (18)$$

认为:在不同坡形下, PI_{30} 与坡面土壤侵蚀量之间关系密切,均呈 S 形曲线,但密切程度有别;降雨量与坡面径流量之间关系也密切,密切程度亦有差异,两者之间呈线性关系。

3.1.2 降雨因子对坡面产流、产沙的影响序列灰色关联分析 选用 8 ~ 14 # 径流小区 1989 ~ 1991 年 15 场次降雨径流泥沙实测资料进行灰色关联分析,结果如下:

降雨特征对坡面径流量的影响序列为:降雨量 $P >$ 降雨动能 $E >$ 复合因子 $PI_{30} >$ 复合因子 $PI >$ 平均雨强 $I >$ 10 min 最大雨强 $I_{10} >$ 30 min 最大雨强 $I_{30} >$ 复合因子 $PI_{30} >$ 降雨历时 T 。各降雨特征因子对坡面泥沙量的影响序列为:降雨动能 $E >$ 30 min 最大雨强 $I_{30} >$ 复合因子 $PI >$ 复合因子 $PI_{10} >$ 10 min 最大雨强 $I_{10} >$ 复合因子 $PI_{30} >$ 降雨量 $P >$ 平均雨强 $I >$ 降雨历时 T 。

3.1.3 表层黄土抗剪力及可蚀性的时空变化规律 土壤抗剪力的时间变化主要取决于气候

条件,尤其是前期降水条件,同时受犁地和表土结皮的影响。干旱季节(10月至翌年5月)土壤抗剪力偏低,雨季(6月至9月)土壤抗剪力偏高。土壤抗剪力的空间变化规律是:在梁峁顶、梁峁坡和沟谷3个地貌类型区,0~15 cm土层的抗剪力变化达极显著水平,而15~30 cm土层的不显著,所以,在以水力侵蚀为主的小流域,水土流失主要发生在0~15 cm土层。土壤可蚀性的程度是:梁峁坡>梁峁顶>沟谷,所以小流域治理序列应为:梁峁坡→梁峁顶→沟谷。

3.2 人为因素与土壤侵蚀关系研究

3.2.1 小流域人为因素减水减沙效果的定量分析与评价 将人为因素抑制水土流失作用按措施类型划分为林草、梯田工程、坡面小型拦蓄工程、沟道工程和村庄道路工程5个类型,通过治理前、后径流泥沙分配资料,运用面积对比法计算各类措施的减水减沙效果。

各类措施减水量占全流域减水量为:林草 18.46%,梯田工程 42.49%,坡面小型拦蓄工程 20.42%,沟道工程 3.63%,村庄道路工程 2.58%,其作用效果由大到小的序列为:梯田工程>坡面小型拦蓄工程>林草>沟道工程>村庄道路工程;各类措施减沙量占全流域减沙量为:林草 31.37%,梯田工程 13.48%,坡面小型拦蓄工程 7.07%,沟道工程 5.20%,村庄道路工程 0.31%,其作用效果由大到小的序列为:林草>梯田工程>坡面小型拦蓄工程>沟道工程>村庄道路工程。

通过建立产流产沙模型,运用成因分析法,进行全流域人为因素减水减沙效果评价:

人为因素对流域减水的贡献率为 79.11%,对流域减沙的贡献率为 85.69%;非人为因素(降水减少)对流域减水的贡献率为 20.89%,对流域减沙的贡献率为 14.31%。

结果表明:该流域人为因素(指抑制作用)对减水减沙的作用效果是显著的,说明以小流域为单元的水土保持综合治理是切实可行的,所以,水土保持综合治理更应该注重减少径流,切断径流流路,削减外动力,增加降雨就地入渗拦蓄。

3.2.2 人工草地不同植被度对产流产沙的影响研究 当植被度依次为 20%, 40%, 60%, 80%时,径流深(相对于 5%植被度比较)减少率依次为 20.34%, 30.17%, 46.45%, 56.31%,侵蚀量减少率依次为 34.96%, 51.97%, 70.15%, 81.10%。即径流深减少率,侵蚀量减少率随着植被度增大而增大,侵蚀量的增长幅度大于径流深的增长幅度。

不同 I_{30} 情况下,植被度与径流深、侵蚀量的关系呈幂曲线。植被度的高低,在低雨强时,对径流深影响大,在高雨强时,对侵蚀量影响大。

通过对不同植被度径流小区 1992~1994 年 27 场次资料进行曲线回归,结果如下:

$$\text{植被度与平均径流深的关系: } H = 17.844X^{-0.3918} \quad (19)$$

$$\text{植被度与平均侵蚀量的关系: } M = 22.2707 - 4.4438L_n^X \quad (20)$$

式中: H ——平均径流深(mm); M ——平均侵蚀量(t/km^2); X ——植被度(%)。

3.3 小流域水土流失时空分布规律研究

3.3.1 流域土壤侵蚀类型及侵蚀方式的时空分布 (1)从时间上看,高泉沟流域的水力侵蚀和重力侵蚀主要集中在 5~8 月份,冻融侵蚀主要发生在冬春之交期间;(2)从空间上看,各级梁峁坡地上以水力侵蚀为主,梁峁顶和梁峁坡上部主要是面蚀,在梁峁中、下部浅沟侵蚀活跃,且大多已转化为切沟,在沟缘线以下的沟坡上则以水力侵蚀、重力侵蚀为主,有些还与冻融侵蚀交替作用,相互叠加;(3)冻融侵蚀作为一种特殊的侵蚀类型,主要分布在沟缘线以下的沟坡上,其含沙量达 600~900 kg/m^3 ,0~15 cm 土层含盐量超过 0.3%,不利于作物生长。

3.3.2 径流量、土壤流失量的时段分布规律

(1) 次降雨径流量、土壤流失量的时段分布:对 1989 年 7 月 25 日单次典型暴雨产流产沙过程研究表明,产流历时 5 h,其中中间 1 h 内径流量、土壤流失量分别占总量的 66.34%, 79.88%,而产流初期 2 h 内分别占总量的 30.73%, 18.18%,产流末期分别占总量的 2.93%, 1.85%,说明径流量和土壤流失量的时段分布基本同步,径流量大,土壤流失量也大,反之亦然。

(2) 年内分布规律:径流量、土壤流失量年内分布见表 1。6 月中旬以前为洪水含沙量较低时期,平均含沙量 57.9 kg/m^3 ,径流量的变化大;6 月中旬至 9 月底为洪水含沙量较高时期,平均含沙量达 145.4 kg/m^3 ,该期径流量的变化幅度小,土壤流失量的变化幅度大。

(3) 年际分布规律:高泉沟流域产流雨量、径流量和土壤流失量年际分布见表 2。研究表明,高泉沟流域径流量、土壤流失量的年际分布与产流雨量的年际分布之间的关系并不密切。产流雨量、径流量、土壤流失量的年际变异系数分别为 0.285 4, 1.798 6, 1.149 3,说明在产流雨量年际变异幅度较小的情况下,径流量和土壤流失量的年际变异幅度较大,且径流量的年际变异幅度大于土壤流失量的变异幅度。另外,1989 年和 1991 年较其它年份典型暴雨频次偏多,2 a 集中了 6 a 径流总量的 80.99%,集中了 6 a 土壤流失总量的 85.88%,而 1992 年由于没有典型暴雨,该年的径流量、土壤流失量仅占 6 a 总量的 0.31%, 0.16%。说明黄土高原小流域水土流失主要由典型暴雨引起这样一个共性。

表 1 高泉沟流域径流量及土壤流失量年内分布

项 目	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	合 计
径流量(m^3)	4198	47	35565	15509	21119	6742	3616	86796
占径流总量(%)	4.84	0.05	40.98	17.87	24.33	7.77	4.17	100
土壤流失量(t)	83.19	2.25	2196.2	923.34	4098.92	400.1	79.18	8503.18
占土壤流失总量(%)	0.98	0.03	34.3	10.86	48.20	4.71	0.93	100
产流次数	1	0.3	1.3	2	1.8	3.5	1.2	11.1
占总产流次数(%)	9.01	2.70	11.71	18.02	16.22	31.53	10.81	100

注:各月径流量、土壤流失量及产流次数均为 1989~1994 年 6 a 的平均值。

表 2 高泉沟流域产流雨量、径流量、土壤流失量年际分布表

项 目	1989 年	1990 年	1991 年	1992 年	1993 年	1994 年	变异系数
产流雨量(mm)	239.7	138.75	119.5	121.4	166	225.99	0.2854
径流量(m^3)	172608.04	18219.2	249475.12	1633.0	21024.42	58146.06	1.7984
土壤流失量(t)	25673.61	2302.45	18142.92	80.68	1514.0	3305.44	1.1493

3.3.3 水土流失的空间分布规律

(1) 不同地貌形态土壤侵蚀区水土流失空间分布规律:高泉沟流域不同侵蚀类型区水土流失空间分布见表 3。研究表明,从 1991~1994 年径流量累计总量看,径流量的空间分布是:梁峁坡面侵蚀区>沟谷侵蚀区>阶坪川台侵蚀区,分别占总量的 71.15%, 22.87%, 5.98%;土壤流失量的空间分布是:沟谷侵蚀区>梁峁坡面侵蚀区>阶坪川台侵蚀区,分别占总量的 75.64%, 22.59%, 1.77%。平均产流模数是:梁峁坡面侵蚀区 [$10\ 807.55 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] > 沟谷侵蚀区 [$7\ 657.95 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] > 阶坪川台侵蚀区 [$3\ 895.25 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; 平均产沙模数是:沟谷侵蚀区 [$1\ 767.04 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] > 梁峁坡面侵蚀区 [$239.40 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] > 阶坪川台侵蚀区 [$80.4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]。所以,梁峁坡面侵蚀区为主要产流区,占全流域径流量的 70%,而沟谷

侵蚀区为主要产沙区, 占全流域土壤流失量的75%。回归分析表明, 梁峁坡面侵蚀区径流量对沟谷土壤流失量的影响显著, 其关系式为:

$$M = 0.005Q^{1.2395} \quad (21)$$

式中: M ——沟谷侵蚀区的土壤流失量(t); Q ——梁峁坡面侵蚀区的径流量(m^3)。

表3 高泉沟流域不同侵蚀区水土流失空间分布

年份	项目	梁峁坡面侵蚀区	阶坪川台侵蚀区	沟道侵蚀区	合计
1991	产流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$]	33194.18	12667.52	214848.91	
	径流量(m^3)	180443.58	16049.75	52981.79	249475.12
	产沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]	795.92	171.85	5514.43	
	土壤流失量(t)	4326.6	217.73	13598.59	18142.92
1992	产流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$]	180.25	180.36	172.20	
	径流量(m^3)	979.84	228.52	424.64	1633
	产沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]	8.91	8.91	8.51	
	土壤流失量(t)	48.41	11.29	20.98	80.68
1993	产流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$]	2707.34	1278.3	1900.94	
	径流量(m^3)	14717.09	1619.61	4687.72	21024.42
	产沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]	76.12	65.19	412.65	
	土壤流失量(t)	413.81	82.6	1017.59	1514.00
1994	产流模数 [$m^3/(km^2 \cdot a)$]	7148.45	1454.83	7073.73	
	径流量(m^3)	38858.97	1843.27	17443.82	58146.06
	产沙模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]	76.65	76.65	1132.57	
	土壤流失量(t)	416.67	95.85	2792.92	3305.44

(2) 不同土地利用措施下水土流失空间分布规律: 从1991~1994年4a累计的绝对量看, 径流量由大到小的序列是: 坡耕地($93\ 727.83\ m^3$)、林地($82\ 265.83\ m^3$)、草地($81\ 586.29\ m^3$)、村庄道路($40\ 153.56\ m^3$)、沟谷沟底难利用地($30\ 540.66\ m^3$)、荒坡地($16\ 864.7\ m^3$)、梯田川台地($15\ 564.72\ m^3$); 土壤流失量由大到小的序列是: 坡耕地($7\ 237.74\ t$)、沟坡沟底难利用地($6\ 435.56\ t$)、林地($5\ 413.24\ t$)、草地($3\ 895.87\ t$)、荒坡地($949.18\ t$)、梯田川台地($700.26\ t$)、村庄道路($582.44\ t$)。4a平均产流模数由大到小的序列为: 村庄道路 [$21\ 918.17\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、沟坡沟底难利用地 [$19\ 826.1\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、荒坡地 [$19\ 371.83\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、坡耕地 [$16\ 975.67\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、草地 [$15\ 171.42\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、林地 [$10\ 267.95\ m^3/(km^2 \cdot a)$]、梯田川台地 [$1\ 154.3\ m^3/(km^2 \cdot a)$]。4a平均产沙模数由大到小的序列为: 沟坡沟底难利用地 [$5\ 275.05\ t/(km^2 \cdot a)$]、坡耕地 [$1\ 302.41\ t/(km^2 \cdot a)$]、荒坡地 [$901.5\ t/(km^2 \cdot a)$]、草地 [$725.5\ t/(km^2 \cdot a)$]、林地 [$683.13\ t/(km^2 \cdot a)$]、村庄道路 [$317.93\ t/(km^2 \cdot a)$]、梯田川台地 [$52.1\ t/(km^2 \cdot a)$]。

3.4 小流域水流泥沙概念性耦合模型研究

以“七·五”末期的1989年作为“七·五”治理的代表年, 对其进行概念性模型模拟, 确定其参数, 进而运用1990~1994年30场洪水作为检验, 计算“八·五”与“七·五”治理的减水减沙效果。

3.4.1 小流域水流泥沙概念性耦合模型建立 模型参数结果: 见表4, 表5。模拟结果: 见表6, 表7和表8。

表 4 1989 年产汇流计算参数一览表

序号	参数名称	单位	参数值
1	WM	mm	225
2	KA		0.9
3	FC	mm/h	0.52
4	KF		15
5	BF		0.2
6	NN		0.2
7	CKS	min	50
8	KE		10
9	XE		0.25
10	KKI	min	100
11	KKG	min	250

注: WM——土壤蓄水上限; KA——上层土壤对下渗影响的有效系数; FC——流域稳定下渗率; KF——下渗渗透系数; BF——流域下渗率分布曲线指数; NN——流域分单元数; CKS——泥沙颗粒在坡面平均汇集时间; KE——沟道水流传播时间; XE——沟道流量比重系数; KKI——壤中流传播时间; KKG——地下径流传播时间。

表 5 1989 年产汇沙计算参数一览表

序号	参数名称	单位	参数值
1	CM	kg/m ³	400
2	REM	kg	150
3	BS		1
4	CGM	kg/m ³	80
5	SKS	min	50
6	KES		100
7	XES		0.25

注: CM——坡面水流挟沙浓度上限; REM——流域平均坡面抗侵蚀能力; BS——坡面土壤侵蚀能力流域分布曲线指数; CGM——沟道水流达平均流速时的沟道产沙浓度; SKS——泥沙坡面汇集时间; KES——泥沙沟道汇集时间; XES——泥沙速率比重系数。

表 6 1989 年水流模拟结果

洪号	SR (mm)	SRC (mm)	合格度	实测洪峰 (m ³ /s)	计算洪峰 (m ³ /s)	峰显时差 (5 min)	DCQ
890605	0.8	0.85	合格	1.0	1.1	2	0.971
890613	1.3	1.35	合格	1.4	1.6	-1	0.880
890717	1.1	0.92	合格	7.6	6.0	0	0.930
890722	0.1	0.1	合格	0.2	0.23	6	0.821
890725	9.7	11	合格	40	37.9	0	0.972
890818	1.0	1.0	合格	0.3	0.25	-5	0.895

注: SR——实测径流深; SRC——计算径流深; DCQ——流量过程模拟的有效系数。

表 7 1989 年泥沙模拟结果

洪号	MS (t/km ²)	MSC (t/km ²)	合格度	实测洪峰 (kg/s)	计算洪峰 (kg/s)	DCS
890605	75	25	不合格	110	45	0.182
890613	58	55	合格	60	59	0.998
890717	236	205	合格	1 098	1 130	0.998
890722	2	2	合格	12	12.4	0.995
890725	2 407	2 410	合格	16 429	16 560	0.999
890818	16	16	合格	15	15.4	0.997

注: MS——实测输沙模数; MSC——计算输沙模数; DCS——输沙率过程模拟的有效系数。

表 8 1989 年水流泥沙模拟精度统计

部分	流域	洪水次数	合格率	EAB	ΔAB	DC
水流模拟	高泉沟	6	100%	1.58	11.3%	0.915
泥沙模拟	高泉沟	6	83%	87	3.11%	0.862

注: EAB——次洪产流量和产沙量模数绝对误差之和; ΔAB——次洪产流量和产沙模相对误差之和; DC——洪水流量和输沙率过程模拟有效系数的算术平均值。

结果分析: 该次模拟总的讲效果好, 具有较理想的精度。次洪产流量的合格率达 100%, 次洪产沙模数合格率 83%。流量模拟的有效性系数均在 0.821 以上, 泥沙模拟除一次洪水不合格外, 输沙率过程有效性系数均 0.995 以上。洪水流量过程平均有效性系数 0.915, 输沙率过程平均有效性系数 0.862。

3.4.2 模型应用 主要应用于水流泥沙概念性耦合模型评估水土保持减水减沙效果。

计算径流深 $R_C = 23.097$ mm, 计算输沙模数 $M_C = 1184.8$ t/km², 与实测值相比较计算水土保持减水总效果(δR_C)减沙总效果(δS_C):

$$\delta R_C = (R_C - R) / R_C \times 100\% = (23.097 - 9.234) / 23.097 \times 100\% = 60.02\%$$

$$\delta S_C = (M_C - M) / M_C \times 100\% = (1184.8 - 599.22) / 1184.8 \times 100\% = 49.42\%$$

所以, 高泉沟流域水土保持措施“八·五”与“七·五”相比, 减水总效果 60.02%, 减沙总效果 49.42%, 说明水土保持综合治理效果很显著。

4 结 论

通过在高泉沟流域进行土壤侵蚀规律研究, 我们可以得出如下一些结论:

(1) 在定西黄土丘陵沟壑区, 可以用 PI_{30} 作为表示降雨侵蚀力指标, 用降雨量 P 作为坡面产流的指标。

(2) 在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 坡长范围内, 坡度与土壤侵蚀量关系密切, 但是, 随着 PI_{30} 的不同, 其关系呈直线、幂曲线、指数曲线; 在降雨量小于 30 mm 时, 坡度与坡面径流量关系密切, 呈指数和双曲线两种。另外, 坡长 10 ~ 25 m 范围内, 坡长与土壤侵蚀量之间关系呈双曲线和直线。因此, 本区范围内可以用上述关系式作为推求坡面径流量、土壤侵蚀量的依据。

(3) 表层黄土抗剪力研究表明: 以水力侵蚀为主的小流域, 水土流失主要发生在 0 ~ 15 cm 土层。土壤抗剪力空间变化是: 沟谷 > 梁峁顶 > 梁峁坡, 即土壤可蚀性程度是: 梁峁坡 > 梁峁顶 > 沟谷。所以, 小流域治理应为: 梁峁坡 → 梁峁顶 → 沟谷。该结论具有普遍指导意义。

(4) 人为因素(抑制作用)对流域减水、减沙的贡献率分别为 79.11%, 85.69%, 由于降水减少对流域减水的贡献率为 20.89%, 对流域减沙的贡献率为 14.31%。证明, 该流域通过“七·五”、“八·五”期间的综合治理, 其作用效果是显著的, 进而说明, 在水土流失严重地区和生态环境脆弱地带, 只有通过人们合理的生产活动, 才能实现有效地控制水土流失和改善生态环境, 其中的关键技术是增加降雨就地入渗拦蓄、提高资源利用率。

(5) 通过小流域水土流失时空分布规律研究, 认为: 梁峁坡面为主要产流区, 占总量的 70%, 沟谷为主要产沙区, 占总量的 75%。从不同用地类型分析, 产流模数的序列为: 村庄道路 > 沟坡沟底难利用地 > 荒坡地 > 坡耕地 > 草地 > 林地 > 梯田川台地; 产沙模数的序列为: 沟坡沟底难利用地 > 坡耕地 > 荒坡地 > 草地 > 林地 > 村庄道路 > 梯田川台地。所以, 村庄道路、沟坡沟底难利用地、坡耕地、荒坡地仍是今后继续治理的重点地类, 梯田、林草是控制水土流失的主要措施。

(6) 小流域水流泥沙概念性耦合模型中, 以“七·五”末期 1989 年进行概念性模型模拟, 其结果流量平均有效性系数 0.915, 输沙率平均有效性系数 0.862, 精度满足要求。进而以此模型评估水土保持减水减沙效果, “八·五”与“七·五”治理相比, 减水总效果 60.02%, 减沙总效果 49.42%, 说明水土保持综合治理效果很显著。

70年代由于水利水土保持工程措施的影响,粗泥沙模数大于 $5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围缩小,集中分布在皇甫川、孤山川、窟野河、佳芦河4条支流,神木至温家川区间粗泥沙模数也降低到 $18\,720\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

80年代由于降水偏少,粗泥沙模数大于 $5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围显著缩小,主要分布在皇甫川和窟野河2条支流,最大粗泥沙模数峰值出现在皇甫站,仅为 $6\,440\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

1990~1995年粗泥沙模数大于 $5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围仅分布在窟野河中下游,最大粗泥沙模数峰出现在神木至温家川区间,粗泥沙模数为 $13\,220\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。但粗泥沙模数大于 $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围较80年代有所增大。80年代粗泥沙模数大于 $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围主要分布在皇甫川至窟野河之间的几条支流的中下游,1990~1995年粗泥沙模数大于 $2\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的范围不仅分布在皇甫川至窟野河之间的几条支流的中下游,而且扩大到无定河、清涧河流域的中下游。渭河上游六盘山以西地区,70年代以后粗泥沙模数均在 $1\,000\text{ t}/\text{km}^2$ 以下。

河龙区间70年代以后粗泥沙范围明显减小,70年代较1954~1969年减小21.6%,80年代减小49.1%,1990~1995年减小34.3%。泾河及北洛河上游70年代以后较1954~1969年减小33.6%,80年代减少40.5%,1990~1995年增加23.1%。说明在大力开展水利水土保持后黄河中游干支流的泥沙都有不同程度细化,但水保工程抗御大洪水的能力有限,且不同流域治理程度不同。水保效益也不一样,1990~1995年粗泥沙面积增大就说明了这个问题。

从粗泥沙模数值看,泾河及北洛河上游地区粗泥沙模数各年代都低于 $3\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,70年代前和70年代后峰值变化不大。河龙区间70年代以后由于水利水保工程的作用,粗泥沙模数 $>10\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的面积正不断地缩小。可以认为水利水土保持措施在使黄河泥沙变细方面起着积极的作用。

3 结 论

综上所述,70年代以后,黄河中游输沙模数与粗泥沙模数变化较大,虽然与气候有一定关系,但主要是70年代以来开展的水利水保措施对黄河中游输沙模数及粗泥沙模数的变化影响所致。从总体变化趋势看,输沙模数与粗泥沙模数值变小,高值区范围在缩小,反映水土保持对流域减水减沙效益明显。同时分析表明,输沙模数与粗泥沙模数的变化在不同流域变化不一致,水利水保治理程度高的流域如无定河、三川河变化较大,输沙模数与粗泥沙模数值及变化范围减少明显,水保效益明显;而治理程度低,受水利水保影响小的流域如窟野河流域沙量变化主要决定于降水等自然因素的影响。

(上接第9页)

参 考 文 献

- 1 中国科学院资源环境科学局主编. 黄土高原小流域综合治理与展望. 北京: 科学文献出版社, 1992
- 2 包为民. 水土保持措施减水减沙效果分析评估研究. 人民黄河, 1994(1)
- 3 万廷朝. 黄丘V副区降雨和地形因素与坡面水土流失关系. 中国水土保持, 1996(12)
- 4 朱兴平. 黄丘V副区小流域水土流失的时空变化. 中国水土保持, 1995(12)
- 5 陈永宗等. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988
- 6 景可等. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 科学出版社, 1990